저수분 식품의 미생물학적 안전성 확보를 위한 최신 기술 동향

Recent advances in decontamination technologies for ensuring microbiological safety of low-moisture foods

정지인*

Jiin Jung*

경상국립대학교

Department of Food and Nutrition, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam 52828, Republic of Korea

정 지 인

Correspondence to

Jiin Jung
Department of Food and Nutrition, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam 52828, Republic of Korea
Tel: 055-772-1438
Email: jiin.jung@gnu.ac.kr

서론

수분활성도(water activity, a_w)가 0.85 미만인 저수분 식품(low-moisture foods, LMF)은 미생물 증식이 어렵다는 인식 때문에 전통적으로 미생물학적 위험이 낮은 식품으로 간주되어 왔으나, 최근 견과류, 땅콩버터, 분유, 밀가루 등 LMF 관련 식중독 발생 및 리콜 사례가 증가하며 이러한 인식 재고와 LMF의 미생물학적 안전성 확보를 위한 다양한 제어 기술 개발 및 적용에 대한 수요가 높아지고 있다(Anderson 2019; Deng et al., 2021; Onyeaka et al., 2024; S´anchez-Maldonado et al., 2018). *Salmonella* spp., *Bacillus cereus*, *Cronobacter sakazakii*, *Clostridium* spp., *E. coli* O157:H7, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* 등 식중독균에 의한 오염은 LMF의 생산, 가공, 저장 및 운반 등 다양한 경로를 통해 발생할 수 있고, 내열성이 강한 아포 및 곰팡이독 생성 뿐만 아니라 장기간 생존으로 소비자의 건강에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라 식품 산업에 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다(Deng et al., 2020; S´anchez-Maldonado et al., 2018; Syamaladevi et al., 2016; Taylor et al., 2019; Wason et al., 2021). 미국, 캐나다, 뉴질랜드, 호주, 유럽연방국가 등에서 보고된 LMF 관련 식중독 및 리콜 사례는 2012년 이후 1,700건 이상으로 이 중 *Salmonella enterica*에 의한 식중독(44건, 81.5%)과 리콜(1,393건, 84.0%)이 가장 많은 것으로 보고되고 있으며, 지난 10년간 미국 내 발생한 22건의 리콜에 의한 경제적 손실은 30억원 이상에 달하는 것으로 추산된다(Acuff et al., 2023;

Gomez and Marks, 2020; Onyeaka et al., 2024).

LMF 환경에서의 미생물의 생장과 사멸은 병원체의 균주와 혈청형, 저장 온도 및 습도, 식품 조성 및 구조, 수분활성도와 같은 다양한 요인에 의해 복합적으로 영향을 받는다. 특히 수분활성도는 미생물 증식에 필수적인 요소이며, 수분활성도가 감소할 수록 병원균의 열 저항성(thermal resistance)이 증가하기 때문에 일반 식품에서의 미생물의 생존 및 사멸과는 다른 특성을 보인다. 이러한 높은 열 저항성은 전통적인 열처리 기술의 적용을 어렵게 만들며 LMF 특성에 맞는 효과적인 미생물 제어 기술의 개발 및 유효성 검증의 필요성을 제시한다(Onyeaka et al., 2024; Rachon et al., 2016; S´anchez-Maldonado et al., 2018; Wason et al., 2021).

본 논문은 LMF 관련 주요 식중독 원인균을 효과적으로 제어하기 위해 연구되고 있는 다양한 제어 기술의 현황과 상업적 활용 가능성을 고찰함으로써 LMF 안전성 문제를 이해하고 해결책을 모색하는데 기여하고자 한다(Table 1).

본론

1. 열처리 기술(thermal processing technologies)

1.1. 열풍 건조 및 로스팅(hot-air drying and roasting)

열풍 건조와 로스팅은 높은 온도를 이용해 견과류, 건조과일 및 채소류와 같은 제품의 품질 특성을 부여하고 식품의 수분을 증발시켜 저장성을 향상시킬 수 있다. 아몬드, 피스타치오, 땅콩 등과 같은 견과류를 포함해 건조 과일 및 채소류, 향신료 등 다양한 식품에서 *Salmonella*와 같은 식중독균의 생장을 억제하기 위한 기술로 사용되고 있다(Casulli et al., 2018; Gurtler et al., 2020; Zhang et al., 2017). 열풍 건조 및 건식 로스팅 공정에 사용되는 온도가 증가할 수록 미생물 생육 억제 효과는 증가하는 것으로 알려져 있으며, 식품의 수분활성도와 공정 중 습도 또한 살균 효과에 영향을 미치는 중요한 요인으로 보고되고 있다(Casulli et al., 2018). 수분활성도 0.90 이상의 참깨를 130℃에서 로스팅 처리했을 때, *Salmonella* 균수는 10분 이내에 검출한계(1.7 log CFU/g) 이하로 감소하였으나, 수분활성도를 0.45로 낮춘 참깨를 동일한 조건에서 처리 시 60분이 지난 이후에도 3.5 log CFU/g 수준으로 잔존하는 것으로 나타났다(Zhang et al., 2017). 또한, 동일 조건에서 로스팅 처리 시 건조 피스타치오와 비교해 물에 불려 수분활성도를 높인 피스타치오에서 *Salmonella*가 55~88% 빠르게 감소한 사례도 보고되었으며(Casullie et al., 2018), 이러한 연구 결과는 로스팅 공정 중 식품의 초기 수분활성도가 미생물의 사멸에 큰 영향을 미치는 중요한 요인임을 시사한다.

1.2. 진공 증기 살균(vacuum steam pasteurization)

진공 증기 살균은 진공상태에서 증기(steam)을 적용해 60-105℃ 범위의 상대적으로 낮은 온도에서 살균(pasteurization)함으로써 식품의 병원균을 감소하는 동시에 저수분 식품이 가진 품질 특성을 유지하기 위한 목적으로 사용되는 열처리 공정이다(Sukarno et al., 2023). 종자류와 향신료를 1분 정도 단시간 처리 시 *Salmonella*와 *E. coli* O157:H7과 같은 식중독균을 5 log CFU/g 이상 감소시킬 수 있으며, 이 외 다른 호기성균, 효모, 곰팡이 등을 효과적으로 감소시키는 것으로 보고되고 있다(Newkirk et al., 2018; Shah et al., 2017). 또한, 살구, 건포도와 같은 건조 과일과 견과류(마카다미아)를 진공 증기 살균 처리 시 *Salmonella*, shiga toxin-producing *E. coli*, *Listeria monocytogenes* 등이 5 log 이상 감소하였으며, 이러한 결과는 62-82℃ 정도의 낮은 온도에서도 5분 이내의 짧은 처리만으로도 식품의 화학적 특성 변화 없이 미생물학적 안전성을 향상시킬 수 있음을 제시한다(Acuff et al., 2020).

1.3. 고주파 가열(radio frequency heating)

고주파 가열은 3kHz-300MHz 범위의 유전 가열

Table 1. Novel technologies used in low-moisture foods

Technology	Food	Target organism	Mechanism of action	Advantages	Disadvantages
Hot-air drying and roasting	Almond, pecan, peanut, sesame seed	*Salmonella*	Denaturation of microbial proteins and enzymes, and dehydration of the cells	Suitable for dry products like nuts	Can cause significant changes in the quality of food
Vacuum steam pasteurization	Black peppercorn, pistachio, seed, almond, cumin seed	*Salmonella*, *Listeria*, *E. coli*, and their surrogates	Denaturation of microbial proteins and nucleic acids	Moist heat is much more effective than dry heat for inactivating pathogens	A post-treatment is required to restore the food to its original low water activity level
Radio frequency heating	Powdered infant formula, corn, broccoli powder	*Cronobacter*, *Aspergillus*, *Salmonella*	Thermal denaturation of microbial components	More effective a heating low-moisture foods than microwave heating	Non-uniform heating and quality changes are potential concerns
Infrared heating	Almond	*Salmonella*	Thermal denaturation of microbial proteins and damage to cellular structures	Used for pasteurization of products like almonds	Quality changes are a potential concern
Extrusion	Pet food, oat flour	*Salmonella*	Thermal and mechanical destruction of microbial cells	Approved by the FDA and USDA for the elimination of foodborne pathogens	The high temperature and moisture levels can alter product quality
High pressure processing	Garlic powder, almond	*Salmonella*	Disruption of cell membranes, inhibiting enzyme function, and denaturation of proteins	Effective for microbial inactivation in high-moisture foods	Effectiveness is reduced in low-moisture foods due to insufficient moisture content
Ultraviolet light	Black peppercorn, barley, rice, walnut, thyme, peanut, coffee bean	*Salmonella*, *Aspergillus*, mycotoxins, aflatoxins	Formation of pyrimidine dimers and damage to the genetic material which inhibits replication	Can be used for surface disinfection and mycotoxin detoxification	Has a low penetration power, limiting its use primarily to surface decontamination
Nonthermal plasma	Black peppercorn, almond, corn, hazelnuts, red pepper powder, dried fig	*Salmonella*, *Staphylococcus*, *Listeria*, mycotoxins, aflatoxins	Damage to the cell membrane and break bacterial covalent bonds	Rapidly gaining ground as an alternative nonthermal technology for surface decontamination	Limited to surface decontamination. Considered an emerging technology requiring further validation
Irradiation	Cookie dough, nuts, black peppercorn, cumin seed, spices, onion powder, peanut, walnut, peanut butter	*Salmonella*, *Listeria*, *E. coli*, *Aspergillus*, aflatoxins	Irreversible damage to microbial DNA and cellular components	Effectively control pathogens in foods with little effect on quality when using low doses	Public perception/ acceptance issues remain a concern in some regions

(dielectric heating)을 이용해 저수분 식품을 포함한 다양한 식품의 저온 살균을 위해 사용해 온 새로운 열처리 방식으로 이온 전도와 물 분자의 회전으로 인한 마찰은 미생물의 세포 사멸에 필요한 열을 발생한다(Figure 1). 전통적인 열처리 공정과 비교하여 저수분 식품의 품질이 크게 향상된 사례도 보고되었으나(Boreddy et al., 2016; Zhang et al., 2020), 식품의 수분 함량, 밀도 등 구성 성분의 유전 특성, 용기의 형태, 처리 조건 등과 같은 여러 요인에 의해 불균일한 가열이 발생하며 식품의 미생물학적 안전성, 품질, 저장성 저하 등을 초래할 수 있다(Sukarno et al., 2023; Xu et al., 2025). Zhang 등(2021)은 65–70°C 온도 조건에서 고주파 가열 시 땅콩의 *Aspergillus flavus* 균수가 효과적으로 감소(3–7 log CFU/g)하였으나, 불균일한 가열로 발생한 콜드 스팟(cold spots)에서 *Aspergillus flavus*의 사멸 효과가 가장 낮게 나타났다고 보고하였다. 이러한 고주파 가열 공정의 단점을 극복하기 위해 다양한 저수분 식품 매트릭스를 이용해 가열 균일성을 높이고 식품 산업에 적용 가능한 적절한 비병원성 대체균주(surrogate)의 식별 및 유효성 검증 연구가 더욱 활발히 이루어져야 할 것이다.

1.4. 적외선 가열(infrared heating)

적외선은 파장이 0.75–1,000μm에 이르는 전자기 스펙트럼(electromagnetic spectrum)의 일부로 식품 산업에서 가장 일반적으로 사용되는 원적외선(far-infrared, 3.0–1,000μm)은 식품 내부로 침투하여 분자의 진동 및 회전을 유발하고 분자가 정상 상태로 돌아올 때 흡수된 에너지가 열로 변환되어 미생물을 불활성화 시킨다. 파프리카 파우더 뿐만 아니라 아몬드, 피스타치오와 같은 견과류에서 *Salmonella*와 대체균주인 *Enterococcus faecium*의 저감 효과를 나타냈으나, 적외선 가열 온도와 처리 시간, 식품의 유형 및 특성, 미생물 균종에 따라 그 효능에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Eliasson et al., 2015; Ha & Kang 2013; S´anchez-Maldonado et al., 2018). 특히 식품의 낮은 수분활성도는 미생물의 내열성을 증가시키고 열전도도(thermal conductivity)를 감소시키기에 저수분 식품의 수분활성도는 적외선 가열 처리 효능에 영향을 미치는 중요한 요인이라 할 수 있

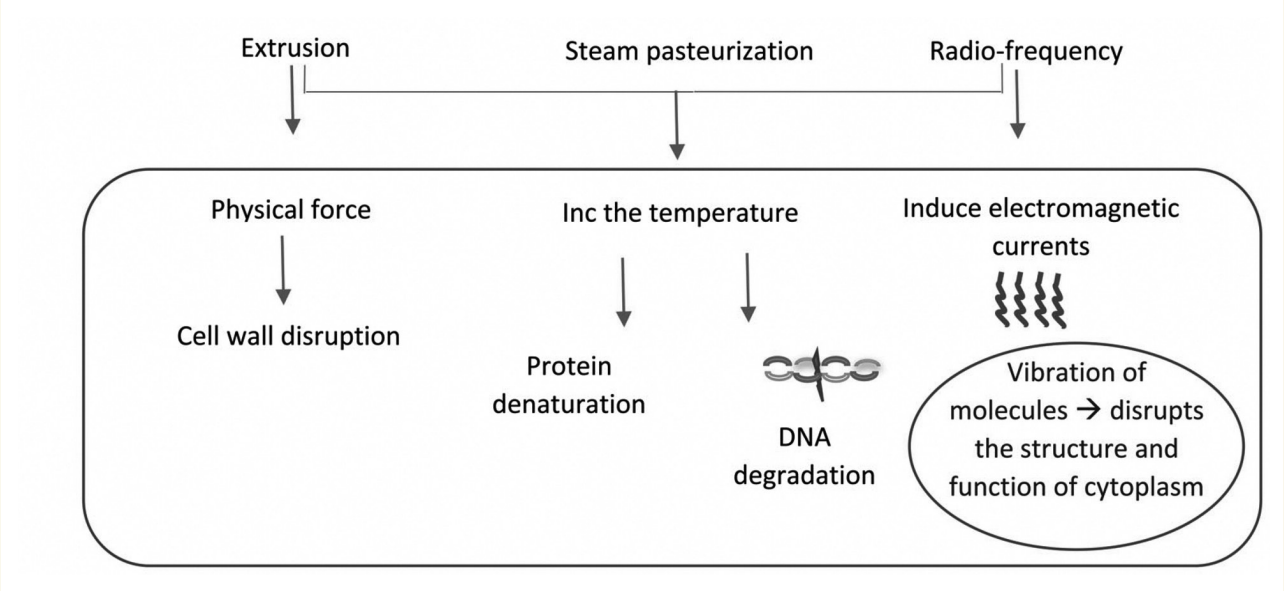

Figure 1. Mechanistic action of thermal inactivation of microorganisms (Wason et al., 2021).

다. 초기 수분활성도가 0.96인 파프리카 파우더를 적외선 가열(11 kW/m^2) 처리 시 *Bacillus cereus*의 포자가 6 log spores/g 이상 감소하였으나, 수분활성도가 0.50–0.80으로 낮은 경우에는 최대 1 log spores/g 감소하며 그 효과가 유의미하지 않은 것으로 나타났다(Staack et al., 2008). 식품의 수분활성도 뿐만 아니라 식품 시료의 유형 및 적용 파장에 따라 침투성이 낮아질 수 있고 식품의 색상 변화를 초래할 수 있는 단점을 극복하기 위해 순차 적외선 열풍처리(sequential infrared and hot air), 마이크로파와 원적외선 조합건조(combined infrared and microwave) 및 간헐적 조사(intermittent infrared radiation) 등 다양한 연구가 제시되고 있으며(Moreira et al., 2025; Venkitasamy et al., 2018), 이러한 하이브리드 기술과 스마트 제어 시스템 개발을 위한 노력을 통해 적외선 공정의 한계를 극복하고 식품 산업 전반에 걸쳐 그 활용도가 넓어질 수 있을 것으로 사료된다.

1.5. 압출(extrusion)

수십 년 동안 식품 산업에 널리 사용되어 온 가공 기술 중 하나인 압출 공정은 고온, 고압 및 전단력(shear force)이 발생하며 짧은 시간 내 식품 성분의 화학 반응과 분자 변형을 유도하고 식중독균의 영양 세포를 효과적으로 사멸시킨다. 상대적으로 저렴한 비용, 높은 생산성, 식품 품질의 안전성과 같은 장점으로 다양한 식품 및 사료 산업에서 활용되고 있으며, 귀리와 옥수수 가루와 같은 저수분 식품에서도 *Salmonella*, *E. coli*와 같은 생물학적 위해 요소를 효과적으로 감소시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Anderson et al., 2017; Ukuku et al., 2012; Verma and Subbiah, 2019). 시리얼 제품의 압출 공정 중 수분활성도 0.89의 귀리 가루를 82℃에서 처리 시 *Salmonella* 균수가 5 log CFU/g 감소하였으며(Anderson et al., 2017), 75℃에서 압출 처리된 옥수수 가루의 *E. coli*(초기 농도 8.8 log CFU/g)는 검출한계(<20 CFU/g) 미만으로 감소하였다(Ukuku et al., 2012). 이러한 압출 공정의 미생물 제어 효과는 식품의 수분 및 지방함량과 같은 내적 요인(intrinsic factors)와 스크류 속도(screw speed), 처리 시간 및 온도 등 외부 요인(extrinsic factor)에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Anderson, 2019). 귀리 가루의 지방 함량이 5%에서 15%로 증가함에 따라 *Salmonella* 저감 효과는 8 log CFU/g에서 0.8 log CFU/g으로 감소했으며, 귀리의 수분 함량이 증가함에 따라 *Salmonella* 감소율이 감소한 것으로 나타났다(Verma and Subbiah, 2019). 이러한 연구 결과들은 압출 공정 중 저수분 식품의 식중독균 불활성화에 영향을 줄 수 있는 식품의 매트릭스와 같은 변수를 고려해 위해 요소를 효과적으로 제어할 수 있도록 식품별 압출 공정 유효성 검증이 효과적으로 이행되어야 함을 시사한다.

2. 비열처리 기술(non-thermal processing technologies)

2.1. 고압 처리(high pressure processing)

초고압 처리(ultra high pressure processing) 또는 고수압 처리(high hydrostatic pressure)라고도 알려진 고압처리 기술은 비열처리 기술로 상온 또는 낮은 공정 온도에서 물을 압력 전달 매체로 활용해 식품에 600–900Mpa 범위의 압력을 가하여 미생물의 세포막 기능을 파괴하고 세포 구성 요소의 누출을 유발함으로써 식품 내 존재하는 미생물의 불활성화를 일으킨다(Acuff et al., 2023). 이러한 고압 처리 기술은 과일 및 채소, 육류와 같은 고수분 식품 내 미생물의 영양세포 불활성화와 식품의 저장성 향상을 위한 목적으로 수년간 사용되어 왔으나, 저수분 식품에 대한 고압 처리 적용 연구는 제한적이다(Ferrentino and Spilimbergo, 2011; Wason et al., 2021). Park 등(2019)은 마늘 분말을 5분간 고압 처리(600MPa) 시 호기성 세균, 효모, 곰팡이가 1–2 log 감소했다고 보고하였으나, 식품 내 압력 전달을 위한 수분 함량이 너무 적은 저수분 식품에는 적합하지 않거나 그 효과가 미미하여 열처리 등 다른 기술과 조합하여 사용하는 것이 권장된다(Tao et al., 2014; Wason et al., 2021). Goodridge 등(2006)은

생아몬드를 고압 처리했을 때(0.8 log) 보다 고압 처리 전 물에 침지하여 수분활성도를 높인 생아몬드에서 더 높은 *Salmonella* 저감(3.37 log) 효과가 나타났으며, 식품의 수분활성도는 고압 처리 공정 중 생아몬드의 *Salmonella* Enteritidis 제어 효과에 영향을 미치는 중요한 요인이라고 보고하였다. 그러나 모든 저수분 식품에 물을 첨가하는 것이 가능한 것은 아니며 제품의 품질 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있기에 저수분 식품에서의 효율적인 고압 처리 기술 적용을 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

2.2. 자외선 (ultraviolet light)

자외선은 100-400nm 범위의 파장을 가진 전자기 스펙트럼(electromagnetic spectrum)으로 파장에 따라 UV-A(315-400nm), UV-B(280-315nm), UV-C(200-280nm), 그리고 UV-V(100-200nm)로 분류된다(S´anchez-Maldonado et al., 2018). 특히 250-270nm에서 살균 효과가 가장 크고 파장이 길어질 수록 그 효과는 감소하나, 자외선을 이용한 살균 효과는 자외선 조사의 강도 및 파장, 노출 시간, 식품의 매트릭스, 미생물 종을 포함한 여러 요인에 의해 영향을 받는다. 자외선의 낮은 침투력 때문에 주로 평평한 표면, 투명한 액체, 공기 중 미생물 불활성화를 위해 사용되며, 처리 시 미생물의 피리미딘 염기(pyrimidine bases)가 자외선을 흡수하여 두 염기 사이에 화학적 이합체가 형성되면 핵산 사슬의 형성이 억제되어 세포 복제가 중단된다(Acuff et al., 2023). *Salmonella, Campylobacter jejuni, Yersinia enterocolitica, Shigella, Vibrio cholerae, E. coli, Bacillus subtilis, Clostridium perfringens*를 포함한 다양한 세균의 영양세포가 자외선에 민감하며(Hijnen et al., 2006), 이 중 일부는 15초 정도의 단시간 노출로도 불활성화 되었다(Bank et al., 1990). 옥수수 가루, 분말 조제분야, 통후추, 호두, 커피원두 등 다양한 저수분 식품 내 세균, 곰팡이와 곰팡이 독소에 대한 자외선 조사 처리의 효과가 입증되었다(Cheon et al., 2015; Choi et al., 2009; Deng et al., 2020; Xie and Hung, 2020). Jubeen 등(2012)은 자외선(265nm, 108J/m^2) 처리 15분 후 호두의 AFG1, AFG2, AFB1, AFB2가 각각 70.25, 68.25, 100, 68.96% 감소하여 네 종류의 곰팡이 독소 중 AFG2가 자외선에 가장 민감하며, 곰팡이 독소에 따라 자외선 조사 처리의 효과가 달라질 수 있음을 보고하였다. 이 외 자외선 조사 처리에 의한 곰팡이 독소의 감소율은 식품 샘플의 두께, 자외선 조사 처리의 강도와 파장에 영향을 받는다고 보고된다(Chang et al., 2013; Jabłońska and Mańkowska, 2014).

2.3. 비열 플라즈마(nonthermal plasma)

플라즈마는 온도에 따라 비열 플라즈마와 열 플라즈마(thermal plasma)로 분류할 수 있다. 이온화된 가스(ionized gas)로 구성되어 전하와 중성 종 사이의 열 평형(thermal equilibrium)이 거의 동일하게 존재하는 열 플라즈마와 달리 비열 플라즈마는 에너지 평형이 없는 플라즈마를 의미하며 식품 가공에서는 미생물의 비활성화에 열이 이용되지 않았음을 나타낸다(Niemira, 2012). 열을 비활성화 메커니즘으로 사용하지 않아 식품 품질 저하를 예방할 수 있을 뿐만 아니라 세포막, 단백질 효소와 DNA 등 여러 세포 구성 요소에 손상을 일으킬 수 있기 때문에 미생물의 내성이 발달할 가능성이 최소화된다(Acuff et al., 2023; Deng et al., 2020). 비열 플라즈마의 항균 효과는 *Pseudomonas, Salmonella, Staphylococcus, Bacillus*를 포함한 다양한 세균, 박테리오파지, 바이러스 등 많은 병원성 미생물에서 보고되고 있으며 바이오필름(biofilm)과 곰팡이 독소(aflatoxin)를 비활성화하는데도 효과적인 것으로 나타났다(Wason et al., 2021). 고춧가루, 파프리카 파우더, 통후추, 아몬드, 헤이즐넛, 옥수수 등 다양한 저수분 식품을 대상으로 비열 플라즈마 기술 적용을 위한 연구가 활발히 진행 중이다(Acuff et al., 2023; Deng et al., 2020; S´anchez-Maldonado et al., 2018; Wason et al., 2021). Lee 등(2015)은 건조 무화과의 수분활성도가 0.70에서 0.93으로 증가함에 따

라 무화과의 *E. coli* O157:H7 및 *L. monocytogenes*의 감소율이 각각 0.5 log CFU/g에서 1.3 log CFU/g, 1.0 log CFU/g에서 1.6 log CFU/g으로 증가하며 식품의 수분활성도가 플라즈마 처리에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나임을 보고하였다. 이 외 플라즈마의 소스, 가스 유형, 작동 전력, 노출 시간, 미생물 균종 및 식품 매트릭스에 따라 비열 플라즈마에 의한 미생물학적 위해 요인 제어 효과는 달라질 수 있다. 기존의 가열 처리 방식이 가진 한계를 극복하고 저수분 식품에 대한 비열 처리 기술 개발의 활용성과 필요성이 높아지고 있는 만큼 대규모 처리를 위한 다양한 에너지원 개발과 플라즈마 처리에 영향을 미칠 수 있는 여러 요소들을 고려한 유효성 검증이 이루어져야 할 것이다.

2.4. 방사선 조사(irradiation)

방사선 조사는 식품 매개 병원균 및 부패 미생물의 제거, 해충 통제, 농산물의 저장 수명 연장 및 발아 지연을 위해 미국 식품의약국(Food and Drug Administration)과 농림부(United States Department of Agriculture)의 승인을 받은 효과적인 비가열 살균 기술이다(FDA, 2016). 식품 처리에 사용되는 세 가지 주요 이온화 방사선(ionizing irradiation)은 γ-ray, x-ray, 전자빔(electron beam)으로 식품 내 수분이 고에너지 방사선에 노출되면 H^+, OH^- 이온과 수산화 라디칼(HO·), 수소 라디칼(H·)같은 반응성 산소 종(reactive oxygen species)을 생성하고 미생물의 DNA를 손상시킴으로써 불활성화를 유도한다(S ´ anchez-Maldonado et al., 2018; Wason et al., 2021). 방사선 조사는 잔류물이 없는 처리 방식으로 식품에 열 손상을 주지 않아 식품의 영양학적, 관능적 특성 변화를 최소화하면서 미생물학적 오염 제어가 가능해 향신료, 허브, 견과류 및 농산물과 같은 식품에 적용 가능하다(Ray and Bhunia, 2007). 특히, 통후추, 아몬드, 호두, 땅콩버터, 쿠키 반죽과 같은 저수분 식품을 대상으로 방사선 조사 처리하여 관능적 변화 없이 *Salmonella* spp. *Listeria monocytogenes*, *E. coli* O157:H7을 검출한계 이하로 감소시킨 사례들이 보고되었다(Ban and Kang, 2014; Jeong et al., 2012; Jeong and Kang, 2017; Sharma et al., 1984). 저수분 식품에서 미생물학적 위해를 제어하는 방사선 조사 처리의 효과와 안전성은 수많은 연구를 통해 입증되었지만, 식품 조사 공정에 대한 지식 부족, 소비자의 부정적 인식, 그리고 일부 식품에 대한 미국 식품의약국의 규제가 산업적 적용을 제한하고 있다. 향후 방사선 조사 기술 확산 및 원활한 활용을 위해서는 소비자 교육과 투명한 규제 시스템 마련을 통한 대중 인식 개선 노력이 동반되어야 할 것이다.

결론

저수분 식품은 낮은 수분활성도에도 불구하고, *Salmonella*를 포함한 주요 식중독 병원체 및 곰팡이 독소에 의해 식중독을 유발할 수 있는 원인 식품으로 인식되고 있다. 저수분 식품의 낮은 수분활성도 환경에서 증가하는 미생물의 열 저항성을 극복하고 식품의 품질을 유지하기 위한 효과적인 미생물 제어 기술 개발 및 과학적인 유효성 검증이 요구된다. 이를 위해 병원체의 열 저항성에 미치는 영향을 이해하기 위한 열역학 및 미생물학적 기초 연구와 새로운 제어 기술의 상업화 연구가 필수적이며, 저수분 식품 매트릭스의 특성 및 가공 조건이 미생물 불활성화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 예측하기 위한 데이터 축적 및 모델링 연구가 시급하다. 이러한 통합 솔루션 시스템 개발을 통한 지속적인 연구 및 상용화 노력은 저수분 식품의 안전성 향상에 기여하고, 궁극적으로 안전하고 신뢰할 수 있는 식품 공급을 가능하게 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Acuff, J. C., Dickson, J. S., Farber, J. M., Grasso-Kelley, E. M., Hedberg, C., Lee, A., Zhu, M-J. 2023. Practice and progress: updates on outbreaks, advances in research, and processing technologies for low-moisture food safety. Journal of Food Protection. 86(1):10018.

2. Acuff J. C., Wu, J., Marik, C., Waterman, K., Gallagher, D., Huang, H., Williams, R. C., Ponder, M. A. 2020. Thermal inactivation of *Salmonella*, Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, and a surrogate (*Pediococcus acidilactici*) on raisins, apricot halves, and macadamia nuts using vacuum steam pasteurization. International Journal of Food Microbiology. 333(16):108814.

3. Anderson, N. M. 2019. Recent advances in low moisture food pasteurization. Current Opinion in Food Science. 29:109-115.

4. Anderson, N. M., Keller, S. E., Mishra, N., Pickens, S., Gradl, D. 2017. *Salmonella* inactivation during extrusion of an oat flour model food. Journal of Food Science. 82(3):738-743.

5. Ban, G. H., Kang, D. H. 2014. Effects of gamma irradiation for inactivating *Salmonella* Typhimurium in peanut butter product during storage. International Journal of Food Microbiology. 171:48-53.

6. Bank, H. L., John, J., Schmehl, M. K., Dratch, R. J. 1990. Bactericidal effectiveness of modulated UV light. Applied and Environmental Microbiology. 56(12):3888-3889.

7. Boreddy, S. R., Thippareddi, H., Froning, G., Subbiah, J. 2016. Novel radiofrequency-assisted thermal processing improves the gelling properties of standard egg white powder. Journal of Food Science. 81(3):665-671.

8. Casulli, K. E., Garces-Vega, F. J., Dolan, K. D. Ryser, E. T., Harris, L. J., Marks, B. P. 2018. Impact of process temperature, humidity, and initial product moisture on thermal inactivation of *Salmonella* Enteritidis PT30 on pistachios during hot-air heating. Journal of Food Protection. 81(8):13511-1356.

9. Chang, M., Jin, Q., Liu, Y., Liu, R., Wang, X. 2013. Efficiency and safety evaluation of photodegradation of aflatoxin B_1 on peanut surface. International Journal of Food Science and Technology. 48(12):2474-2479.

10. Cheon, H. L., Shin, J. Y., Park, K. H., Chung, M. S., Kang, D. H. 2015. Inactivation of foodborne pathogens in powdered red pepper (*Capsicum annuum* L.) using combined UV-C irradiation and mild heat treatment. Food Control. 50:441-445.

11. Choi, M. S., Cheigh, C. I., Jeong, E. A., Shin, J. K., Park, J. Y., Song, K. B., Park, J. H., Kwon, K. S., Chung, M. S. 2009. Inactivation of *Enterobacter sakazakii* inoculated on formulated infant foods by intense pulsed light treatment. Food Science and Biotechnology. 18:1537-1540.

12. Deng, L-Z., Sutar, P. P., Mujumdar, A. S., Tao, Y., Pan, Z., Liu, Y-H., Xiao, H-W. 2021. Thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods. Annual Review of Food Science and Technology. 12:287-305.

13. Deng, L-Z., Tao, Y., Mujumdar, A. S., Pan, Z., Chen, C., Yang, Z-H., Liu, Z-L., Wang, H., Xiao, H-W. 2020. Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods. Trends in Food Science & Technology. 106:104-112.

14. Eliasson, L., Isaksson, S., Lövenklev, M., Ahrné, L. 2015. A comparative study of infrared and microwave heating for microbial decontamination of paprika powder. Frontiers in Microbiology. 6:1071.

15. FDA (US Food and Drug Administration). 2016. Food irradiation: what you need to know. Available at: https://www.fda.gov/media/81259/download

16. Ferrentino, G., Spilimbergo, S. 2011. High pressure carbon dioxide pasteurization of solid foods: current knowledge and future outlooks. Trends in Food Science and Technology. 22(8):427-441.

17. Gomez, C., Marks, B. P. 2020. Monetizing the impact of food safety recalls on the low-moisture food industry. Journal of Food Protection. 83(5):829-835.

18. Goodridge, L. D., Willford, J., Kalchayanand, N. 2006. Destruction of *Salmonella* Enteritidis inoculated onto raw almonds by high hydrostatic pressure. Food Research International. 39(4):408-412.

19. Gurtler, J. B., Keller, S., Fan, X., Olanya, M., Jin, T., Camp, M. 2020. Survival of *Salmonella* during apple dehydration as affected by apple cultivar and antimicrobial pretreatment. Journal of Food Protection. 83(5):902-909.

20. Ha, J. W., Kang, D. H. 2013. Simultaneous near-infrared radiant heating and UV radiation for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium in powdered red pepper (*Capsicum annuum* L.). Applied and Environmental Microbiology. 79(21):6568-6575.

21. Hijnen, W. A., Beerendonk, E. F., Medema, G. J. 2006. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. Water Research. 40(1):3-22.

22. Jabłońska, J., Mańkowska, D. 2014. The influence of UV, X and microwave radiation on the aflatoxin B_1 concentration in nuts. Biotechnology and Food Science. 78(2):111-119.

23. Jeong, S., Kang, D. 2017. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-bake cookie dough by gamma and electron beam irradiation. Food Microbiology. 64:172-178.

24. Jeong, S., Marks, B. P., Ryser, e. T., Harte, J. B. 2012. The effect of X-ray irradiation on *Salmonella* inactivation and sensory quality of almonds and walnuts as a function of water activity. International Journal of Food Microbiology. 153:365-71.

25. Jubeen, F., Bhatti, I. A., Khan, M. Z., Zahoor-Ul, H., Shahid, M. 2012. Effect of UVC irradiation on aflatoxins in ground nut (*Arachis hypogea*) and tree nuts (*Juglans regia*, *Prunus duclus* and *Pistachio vera*). Journal of the Chemical Society of Pakistan. 34(6):1366-1374.

26. Lee, H., Kim, J. E., Chung, M. S., Min, S. C. 2015. Cold plasma treatment for the microbiological safety of cabbage, lettuce, and dried figs. Food Microbiology. 51: 74-80.

27. Moreira, L. R., Perazzini, H., Lima-Corrêa, R. A. B., Borel, L. D. M. S. 2025. Effect of infrared powder and intermittency ratio on combined infrared-convective intermittent drying of banana. Food and Bioproducts Processing. 152:74-87.

28. Newkirk, J. J., Wu, J., Acuff, J. C. Caver, C. B., Mallikarjunan, K., Wiersema, B. D., Williams, R. C., Ponder, M. A. 2018. Inactivation of *Salmonella enterica* and surrogate *Enterococcus faecium* on whole black peppercorns and cumin seeds using vacuum steam pasteurization. Frontiers in Sustainable Food System. 2:48

29. Niemira, B. A. 2012. Cold plasma decontamination of foods. Annual Review of Food Science and Technology. 3:125-142.

30. Onyeaka, H., Anumudu, C., Miri, T., Ahmad, N. H. 2024. A bibliometric analysis of research trends on the microbiological safety of low-moisture foods. Food Research. 8(2):467-488.

31. Park, I., Jeong, U. K., Shahbaz, H. M., Jung, D., Jo, M., Lee, K. S., Lee, H., Park, J. 2019. High hydrostatic pressure treatment for manufacturing of garlic powder with improved microbial safety and antioxidant activity. International Journal of Food Science and Technology. 54:325-334.

32. Rachon, G., Peñaloza, W., Gibbs, P. A. 2016. Inactivation of *Salmonella, Listeria monocytogenes* and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 in a selection of low moisture foods. International Journal of Food Microbiology. 231:16-25.

33. Ray, B., Bhunia, A. 2007. Control by irradiation. In Fundamental Food Microbiology (pp. 411-416). CRC Press.

34. S´anchez -Maldonado, A. F., Lee, A., Farber, J. M. 2018. Methods for the control of foodborne pathogens in low-moisture foods. Annual Review of Food Science and Technology. 9:177-208.

35. Shah, M. K., Asa, G., Sherwood, J., Graber, K., Bergholz, T. M. 2017. Efficacy of vacuum steam pasteurization for inactivation of *Salmonella* PT 30, *Escherichia coli* O157:H7 and *Enterococcus faecium* on low moisture foods. International Journal of Food Microbiology. 244:111-118.

36. Sharma, A., Ghanekar, A. S., Padwal Desai, S. R., Nadkarni, G. B. 1984. Microbiological status and antifungal properties of gamma irradiated spices. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 32:1061-1063.

37. Staack, N., Ahrné, L., Borch, E. Knorr, D. 2008. Effect of infrared heating on quality and microbial decontamination in paprika powder. Journal of Food Engineering. 86:17-24.

38. Sukarno, N. A., Kalaichelvan, A., Limcharoenchat, P., Mutalilb, N. A. A., Ahmad, N. H. 2023. Thermal and nonthermal inactivation of foodborne pathogens on low-moisture foods: a systematic review. Journal of Raw Materials to Processsed Foods. 4(1):47-67.

39. Syamaladevi, R. M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Sablani, S., Carter, B., Campbell, G. 2016. Influence of water activity on thermal resistance of microorganisms in low-moisture foods: a review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 15:353-370.

40. Tao, Y., Da-Wen, S., Eamonn, H., Alan, L. K. 2014. High-pressure processing of foods: an overview. In D.-W. Sun (Ed.), Emerging technologies for food processing (pp. 3-24). Academic Press.

41. Taylor, B. J., Quinn, A. R., Kataoka, A. 2019. *Listeria monocytogenes* in low-moisture foods and ingredients. Food Control. 103:153-160.

42. Ukuku, D. O., Onwulata, C., Mukhopadhyay, S. 2012. Behavior of *Escherichia coli* bacteria in whey protein concentrate and corn meal during twin screw extrusion processing at different temperatures. Journal of Food Processing and Technology. 3(4):1000150.

43. Venkitasamy, C., Zhu, C., Brandl, M. T., Niederholzer, F. J. A., Zhang, R., McHugh, T. H., Pan, Z. 2018. Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354. LWT. 95:123-128.

44. Verma, T., Subbiah, J. 2019. Conical twin-screw extrusion is an effective inactivation process for *Salmonella* in low-moisture foods at temperature above 65°C. LWT. 114:108369.

45. Wason, S., Verma, T., Subbiah, J. 2021. Validation of process technologies for enhancing the safety of low-moisture foods: a review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 20:4950-4992.

46. Xie, J., Hung, Y. C. 2020. Efficacy of pulsed-ultraviolet light for inactivation of *Salmonella* spp. On black peppercorns. Journal of Food Science. 85:755-761.

47. Xu, J., Wang, D., Yang, G., Yuan, Y., Wang, S. 2025. Bactericidal mechanisms of radio frequency energy combined with UV light against *Bacillus cereus* spores based on low-moisture food substitutes. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 102:103981.

48. Zhang, H., Zhao, Y., Gong, C., Jiao, S. 2020. Effect of radio frequency heating stress on sublethal injury of *Salmonella* Typhimurium in red pepper powder. LWT. 117:108700.

49. Zhang, S., Lan, R., Zhang, L., Wang, S. 2021. Computational modeling of survival of *Aspergillus flavus* in peanut kernels during hot air-assisted radio frequency pasteurization. Food Microbiology. 95:103682.

50. Zhang, Y., Keller, S. E., Grasso-Kelley, E. M. 2017. Fate of *Salmonella* throughout production and refrigerated storage of Tahini. Journal of Food Protection. 80(6):940-946.